

高等传递过程原理

► 王 涛 朴香兰 朱慎林 编著



化学工业出版社

教材出版中心

高等传递过程原理

王 涛 朴香兰 朱慎林 编著

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高等传递过程原理/王涛, 朴香兰, 朱慎林编著.
北京: 化学工业出版社, 2004.8
ISBN 7-5025-6062-9

I. 高… II. ①王…②朴…③朱… III. 传递-
化工过程-理论 IV. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 087797 号

高等传递过程原理

王 涛 朴香兰 朱慎林 编著

责任编辑: 陈志良 姚晓敏

责任校对: 郑 捷

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

化学工业出版社印刷厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 435 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6062-9/TQ·2069

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是在清华大学的研究生课程教学资料的基础上形成的，讲授面向化学工程、应用化学、生物化工、环境工程和能源工程等专业的研究生。内容涉及动量传递、热量传递和质量传递等传递过程原理及进展。动量传递和流体力学方面的内容是非牛顿流体和气-液、液-液两相流。热量传递和质量传递方面重点是多组分体系的传质、特殊场合的扩散传质、相间传质、伴有化学反应的传质及复合传质过程。具体章节是第1章为传递物性数据及研究进展；第2章是非牛顿流体和两相流动；第3章为分子扩散传质；第4章是多组分扩散传质；第5章为多孔介质中的扩散传质；第6章为对流传质及相间传质理论；第7章是动量、热量和质量的同时传递；第8章为伴有化学反应的传质过程。

本书的使用对象是已修过本科《传递过程原理》的研究生，但对正在学习“传递过程原理”的本科高年级学生也有指导意义。作为化学工程学科的基础理论，其内容也可供化工、环境和能源等领域科研人员作参考。

本书参考、引用了同行的大量文献资料，在此谨向他们致以诚挚的谢意，限于篇幅，编者将被引用的书名和其他文献列在参考文献中，不再一一详细地罗列被引用的出处。参加本书编写的人员还有李洪波、刘建刚、陈桂光、吴国华、张景涛、蔡泽明、金卫东、王文、万银坤、张英、王敏及蔡卫滨。

随着新理论的提出，传递原理也将不断补充和完善，限于作者的知识水平，书中难免有不当甚至错误之处，希望专家同行和广大读者批评指正。

编 著 者

2004年6月 于清华大学

目 录

第1章 传递物性数据及研究进展	1
1.1 动量、热量与质量传递的类似性	1
1.1.1 现象方程	1
1.1.2 传递通量的普遍化表达式	3
1.1.3 涡流传递的类似性	5
1.1.4 无因次传递准数	5
1.2 流体的黏度	8
1.2.1 黏度的单位	8
1.2.2 气体黏度	9
1.2.3 液体黏度	14
1.2.4 润滑油的黏度指数	20
1.2.5 非牛顿流体的黏度	25
1.3 物质的热导率	28
1.3.1 热导率的单位	28
1.3.2 气体的热导率	28
1.3.3 液体的热导率	33
1.3.4 固体的热导率	36
1.3.5 热导率与温度的关系	36
1.3.6 非牛顿流体的热导率	36
1.4 分子扩散系数	37
1.4.1 气相扩散系数	38
1.4.2 液相扩散系数	42
1.4.3 固相中的扩散系数	45
1.5 表(界)面张力	46
1.5.1 表(界)面张力的近代分子论	46
1.5.2 液-汽(气)界面的表面张力	53
1.5.3 表面张力的估算	55
1.5.4 表面张力与温度的关系	57
1.5.5 水溶液的表面张力	57
1.5.6 液-液界面的界面张力	58
1.5.7 无因次数群	60
1.6 传递物性研究进展	60
习题	60
第2章 非牛顿流体和两相流动	62

2.1 广义牛顿流体的管内流动	62
2.2 黏弹性流体的流动	64
2.2.1 黏弹性流体的特异流动行为	64
2.2.2 黏弹性流体的定常剪切行为	65
2.2.3 黏弹性流体的本构方程及其力学行为	67
2.2.4 拉伸流动	69
2.2.5 流变参数的实验测定	71
2.3 气(液)液两相流动	74
2.3.1 气泡、液滴的基本流动行为	74
2.3.2 管内气液两相流动	79
2.4 气液接触设备	93
2.4.1 气泡的形成规律	93
2.4.2 气液搅拌槽	99
2.4.3 气液鼓泡塔	103
2.5 液液两相流动和设备	106
2.5.1 液滴和液滴群运动	106
2.5.2 筛板萃取柱	109
习题	114
第3章 分子扩散传质	116
3.1 浓度、速度和通量	116
3.2 质量衡算方程和扩散方程	119
3.3 定常分子扩散	121
3.4 耦合过程的分子扩散	126
3.4.1 热扩散	126
3.4.2 压力扩散	128
3.5 非定常分子扩散	129
3.5.1 扩散方向的长度为无限大	129
3.5.2 扩散方向的长度为有限长	131
3.5.3 沿垂直平面的降膜中的扩散	133
3.5.4 加权残差法解扩散方程	136
3.5.5 非定常扩散的数值算法	140
3.5.6 扩散方程的图解法	143
3.6 分子扩散系数的实验测定	147
习题	150
第4章 多组分扩散传质	152
4.1 引言	152
4.2 多元体系的 Fick 定律	153
4.2.1 普适化的 Fick 定律	153
4.2.2 多组分 Fick 扩散系数	154
4.2.3 Fick 定律的局限	155

4.3 Maxwell-Stefan 方程	155
4.3.1 扩散机理	155
4.3.2 多组分体系的普遍化 Maxwell-Stefan 方程	157
4.3.3 离散化 Maxwell-Stefan 方程	158
4.3.4 约束问题 (BOOTSTRAP PROBLEM)	159
4.3.5 实例	162
4.3.6 Maxwell-Stefan 扩散系数和传质系数	164
4.3.7 Maxwell-Stefan 扩散系数和 Fick 扩散系数的关系	167
4.3.8 Maxwell-Stefan 方法和 Fick 方法的比较	168
4.4 多组分扩散问题的有效扩散系数模型	169
4.4.1 有效扩散系数	169
4.4.2 有效扩散系数模型求解多组分扩散问题	171
4.4.3 有效扩散系数模型的特点	173
习题	173
第5章 多孔介质中的扩散传质	174
5.1 多孔介质中的扩散机理	174
5.2 多孔介质中的主体扩散和 Knudsen 扩散: 尘气模型 (The dust gas model) ...	175
5.3 多孔介质中的黏性流动	178
5.4 多孔介质中的微孔扩散	180
习题	186
第6章 对流传质及相间传质理论	187
6.1 对流传质的机理	187
6.2 传质系数及其定义	188
6.3 传质理论模型	191
6.4 相间传质与总传质系数	195
6.4.1 相平衡	195
6.4.2 界面状态	197
6.4.3 相间扩散传质	198
6.5 对流传质系数模型	203
6.6 工业装置中的传质	218
6.6.1 有效相间传质面积和容量传质系数	218
6.6.2 等摩尔相对扩散的传质装置计算	219
6.6.3 扩散通过静止膜的传质装置的计算	220
6.6.4 传质单元数的计算	221
6.6.5 总传质单元高度和单相传质单元高度的关系	222
6.6.6 筛板萃取柱的传质性能	222
习题	224
第7章 动量、热量与质量的同时传递	227
7.1 表面传质速率对传递系数的影响	227
7.2 降落液膜中动量与质量同时传递	232

7.3	热量和质量同时传递	235
7.4	湿球温度理论	240
7.5	调湿装置的设计	242
7.6	水冷却塔的计算机辅助设计	243
7.7	冷凝器传热面积的计算	246
7.8	动量、热量、质量同时传递的应用——膜过程	248
	习题	252
第8章	伴有化学反应的传质过程	254
8.1	反应对传质的影响	254
8.2	慢速均相1级反应的传质速率	255
8.3	快速均相1级反应的传质速率	256
8.4	均相双分子1级反应时的传质速率	258
8.5	非均相反应时的扩散传质	261
8.6	均相 n 级反应时的传质速率	263
	习题	265
	参考文献	268
	参考答案	269

第 1 章 传递物性数据及研究进展

传递现象是自然界和工程技术中普遍存在的现象。我们通常所说的平衡状态，是指物系内具有强度性质的物理量，如温度、组分浓度等是不存在梯度而言的。例如热平衡是指物系内的温度各处均匀一致；气体混合物的平衡是指物系内各处具有相同的组成等。反之，若物系处于不平衡状态，即具有强度性质的物理量在物系内不均匀时，则物系就会发生变化。例如冷热两物体互相接触时，热量会由热物体流向冷物体，最后使两物体的温度均匀。对于任何处于不平衡状态的物系，一定会有某些物理量由高强度区向低强度区转移。物理量向平衡方向转移的过程就是传递过程。

在传递过程中所传递的物理量一般为质量、能量、动量和电量等。质量传递是物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区转移；能量传递是热由高温区向低温区转移；动量传递则是实际流体流动过程中，在垂直于流动方向上动量由高速度区向低速度区转移。由此可见，质量、热量与动量传递之所以发生，是由于物系内存在着浓度、温度和速度梯度的缘故，传递过程的规律不仅受物理量梯度影响，而且与物质的传递性质即传递物性有关。

动量、热量与质量传递是一门探讨速率的科学，三者之间具有许多类似之处，它们不但可以用类似的数学模型描述，而且描述三者的一些物理量之间还存在某些定量关系。这些定量关系会使研究三种传递过程的问题得以简化。

1.1 动量、热量与质量传递的类似性

1.1.1 现象方程

若物系中存在速度、温度和浓度梯度时，则分别发生动量、热量和质量传递现象。动量、热量和质量的传递，既可以由分子的微观运动引起，也可由旋涡混合造成流体微团的宏观运动引起。前者称为分子传递，后者称为涡流传递。由分子运动引起的动量传递，可采用牛顿黏性定律描述，由分子运动引起的热量传递可采用傅立叶定律描述；而由分子运动引起的质量传递称为扩散，则采用 Fick（费克）定律描述。牛顿黏性定律、傅立叶定律与费克定律都是现象定律。

(1) 牛顿黏性定律 工程技术中所遇到的流体均为实际流体。实际流体与所谓“理想”流体的一个根本区别，在于前者具有黏性而后者无黏性。因此，当理想流体运动时，两个互相接触的流体层之间不会产生剪切力；此外，理想流体流过固体壁面时，还会产生滑脱现象。但当实际流体运动时，由于黏性作用，流体层之间会产生剪切力，而且当实际流体流过固体壁面时，它会附着于壁面上而不滑脱。

如图 1.1-1 所示，设想在静止的流体中放置两块彼此平行的无限大平板，上板静止，下板以恒速向右运

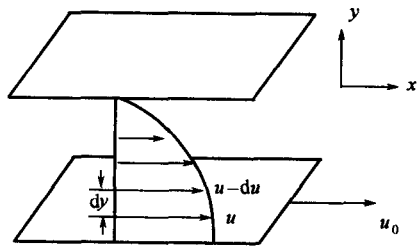


图 1.1-1 牛顿黏性定律示意图

动，于是紧贴在运动平板表面上 ($y=0$) 的一层流体，将跟着平板一起运动，并获得一定的沿 x 方向的动量 (表示为 x -动量)。由于实际流体有黏性，所以板面上的这层流体必然会将其动量的一部分传递给与之毗邻的上层流体，而使后者亦沿 x 方向运动起来。当然，后者的流速要低一些。由此可知，在流体的黏性作用下， x -动量会沿 y 方向层层传递，而使两板间的全部流体沿 x 方向产生运动，最后建立一定的速度分布。如果流速不很大时，两板间的流体作层流流动，此时，动量传递量可用两流体层之间的剪应力 (单位面积上的剪切力) 表示。实验证明，剪应力与速度梯度成正比，用公式表述为：

$$\tau = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (1.1-1)$$

式中 τ ——剪应力；

μ ——动力黏度 (黏度)；

du_x/dy ——速度梯度或剪切速率。

式 (1.1-1) 称为牛顿黏性定律 (Newton's law of viscosity)。剪应力 τ 是作用在垂直于 y 方向单位面积上的力，或 x -动量在 y 方向上的通量。式中的负号表示动量通量的方向与速度梯度的方向相反，即动量要朝着速度降低的方向传递。比例常数 μ 是流体的动力黏度，一般简称为黏度。

(2) 傅立叶定律 对于导热现象，可用傅立叶定律 (Fourier's law) 描述：

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dy} \quad (1.1-2)$$

式中 q/A ——导热通量；

k ——物质的热导率；

dT/dy ——温度梯度。

式 (1.1-2) 中的 q 为沿 y 方向的导热速率， A 为垂直于热流方向 (y 方向) 的导热面积。式中负号表示热通量方向与温度梯度的方向相反，即热量是朝着温度降低的方向传递的。比例常数 k 是物质的热传导系数，也称热导率。

(3) 费克定律 在混合物中若各组分存在浓度梯度时，则发生分子扩散。对于两组分系统，组分 A 在组分 B 中由于分子扩散所产生的质量通量，可用式 (1.1-3) 描述

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1.1-3)$$

式中 j_A ——组分 A 的质量通量；

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数；

$d\rho_A/dy$ ——组分 A 的质量浓度 (密度) 梯度。

式 (1.1-3) 称为费克定律 (Fick's law)。式中 j_A 为组分 A 在单位时间内通过垂直于扩散方向 (y 方向) 的单位面积的质量。式中负号表示质量通量方向与浓度梯度方向相反，即组分 A 总是朝着浓度降低的方向传递的。扩散系数 D_{AB} 与组分的种类、压力、温度、组成等因素有关。

牛顿黏性定律、傅立叶定律和费克定律都用来描述由于分子无规则运动所引起的三类传递现象。由各定律的数学表达式 (1.1-1)、式 (1.1-2) 和式 (1.1-3) 可看出动量、热量与质量传递规律的类似性，即各过程所传递的物理量均与其相应的强度因数的梯度成正比，并且都沿着负梯度 (降度) 方向传递。各式中的系数只是状态的函数，与传递的物理量或梯度无关。因此通常将黏度、热导率和扩散系数视为传递性质的物性常数。由于上述三式中，传

递的物理量与相应的梯度均存在线性关系，故上述的三个定律又常称为分子传递的线性现象定律。

1.1.2 传递通量的普遍化表达式

(1) 动量通量 假设所研究的是不可压缩流体，即密度 ρ 为常数，则牛顿黏性定律式 (1.1-1) 便可写成如下形式：

$$\tau = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u_x)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy} \quad (1.1-4)$$

及
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.1-5)$$

式中 τ —— 动量通量；

ρu_x —— 动量浓度；

$\frac{d(\rho u_x)}{dy}$ —— 动量浓度梯度；

ν —— 运动黏度。

τ 的单位为：

$$[\tau] = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

ν 的单位为：

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

ρu_x 的单位为：

$$[\rho u_x] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^3} \right]$$

$\frac{d(\rho u_x)}{dy}$ 的单位为：

$$\left[\frac{\rho u_x}{y} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}} \right]$$

由式 (1.1-4) 及各量的单位可以看出，剪应力 τ 即单位时间 (s) 通过单位面积 (m^2) 的动量 ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$)，可表示动量通量，它等于运动黏度 (动量扩散系数) (m^2/s) 乘以动量浓度梯度 ($\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^3}/\text{m}$) 的负值，写成文字方程为：

$$(\text{动量通量}) = -(\text{动量扩散系数}) \times (\text{动量浓度梯度})$$

(2) 热量通量 傅立叶定律 (1.1-2)，改写成下式：

$$\frac{q}{A} = -\frac{k}{\rho C_p} \frac{d(\rho C_p T)}{dy} = -\alpha \frac{d(\rho C_p T)}{dy} \quad (1.1-6)$$

及
$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1.1-7)$$

式中 q/A —— 导热通量，其单位为：

$$\left[\frac{q}{A} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

α —— 导温系数或称为热扩散系数，其单位为：

$$[\alpha] = \frac{[k]}{[\rho][C_p]} = \left[\frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{K}}{\text{J}} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$\rho C_p T$ ——热量浓度，其单位为：

$$[\rho C_p T] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \text{K} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$$

$\frac{d(\rho C_p T)}{dy}$ ——热量浓度梯度，其单位为：

$$\left[\frac{\rho C_p T}{y} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}} \right]$$

由式 (1.1-6) 以及各量的单位可以看出，傅立叶定律亦可理解为：导热通量 ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

s) 等于热量扩散系数 (m^2/s) 与热量浓度梯度 ($\frac{\text{J}}{\text{m}^3}/\text{m}$) 乘积的负值，用文字方程表示为：

$$(\text{热量通量}) = -(\text{热量扩散系数}) \times (\text{热量浓度梯度})$$

(3) 质量通量 对于费克定律式 (1.1-3) 中各量的物理意义和单位可直接进行分析，

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy}$$

式中 j_A ——组分 A 的质量通量，其单位为：

$$[j_A] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

D_{AB} ——组分 A 的 (质量) 扩散系数，其单位为：

$$[D_{AB}] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

ρ_A ——组分 A 的密度 (质量浓度) 梯度，其单位为：

$$[\rho_A] = [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$\frac{d\rho_A}{dy}$ ——质量浓度梯度，其单位为：

$$\left[\frac{\rho_A}{y} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}} \right]$$

因此，费克定律亦可理解为组分 A 的质量通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 等于质量扩散系数 (m^2/s) 与质量浓度梯度 ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}/\text{m}$) 乘积的负值，用文字方程表示为

$$(\text{质量通量}) = -(\text{质量扩散系数}) \times (\text{质量浓度梯度})$$

通过以上对于动量通量、热量通量和质量通量的分析，可得到如下几点结论：

a. 动量、热量与质量传递的通量，都等于该量的扩散系数与该量浓度梯度乘积的负值，故三类分子传递过程可用一个普遍的表达式来表述，即：

$$(\text{通量}) = -(\text{扩散系数}) \times (\text{浓度梯度})$$

b. 动量、热量和质量扩散系数 ν 、 α 和 D_{AB} 具有相同的因次，其单位均为 m^2/s 。

c. 通量为向量，它代表动量、热量和质量传递的方向和量值，通量的方向永远与该量梯度的方向相反，故通量的普遍表达式中有一“负”号。

通常将通量等于扩散系数乘以浓度梯度的方程称为现象方程 (Phenomenological equation)，它是一种关联现象的经验方程。动量、热量和质量传递有着统一的、类似的现象方程。

动量扩散系数 (运动黏度) ν 、热量扩散系数 (导温系数) α 和扩散系数 D_{AB} ，可分别采用式 (1.1-4)、式 (1.1-6)、式 (1.1-3) 定义，故三者的定义式均为微分方程。

动量、热量和质量浓度梯度分别表示该量传递的推动力。对于梯度及通量的方向可作如下规定：沿坐标轴的方向是通量的正方向，坐标轴的负方向则是梯度的正方向。因此，现象方程中有“负”号时，表示传递方向与坐标轴同向，而梯度与坐标轴的方向相反。反之，现象方程中有“正”号时，表示传递方向与坐标轴反向，而梯度与坐标轴同向。

1.1.3 涡流传递的类似性

上述的现象方程或现象定律是用来描述分子运动所产生的传递过程。这种传递过程只在固体、静止层或层流流动的流体内才会单独发生。在湍流流体中，由于存在着大大小小的旋涡运动，故除分子传递外，还有涡流传递。旋涡的运动和交换会引起流体微团的混合，从而可使动量、热量或质量的传递过程大大加剧。在湍动十分强烈的情况下，涡流传递的强度大大地超过分子传递的强度。在以涡流传递为主的情况下，动量、热量和质量传递的通量也可以仿照分子传递的现象方程式 (1.1-4)、式 (1.1-6) 和式 (1.1-3) 的形式处理。

对于涡流动量通量，可写成

$$\tau^E = -\epsilon \frac{d(\rho u_x)}{dy} \quad (1.1-8)$$

式中 τ^E —— 涡流剪应力或雷诺应力；

ϵ —— 涡流黏度。

涡流热通量可写成

$$\left(\frac{q}{A}\right)^E = -\epsilon_H \frac{d(\rho C_p T)}{dy} \quad (1.1-9)$$

式中 ϵ_H —— 涡流热扩散系数。

组分 A 的涡流质量通量可写成

$$j_A^E = -\epsilon_M \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1.1-10)$$

式中 ϵ_M —— 涡流质量扩散系数。

式 (1.1-8)、式 (1.1-9) 和式 (1.1-10) 中，涡流传递通量 τ^E 、 $(q/A)^E$ 、 j_A^E 的因次分别与分子传递通量 τ 、 (q/A) 、 j_A 的因次相同，它们的单位分别为 N/m^2 、 $J/(m^2 \cdot s)$ 、 $kg/(m^2 \cdot s)$ 。各涡流扩散系数 ϵ 、 ϵ_H 、 ϵ_M 的因次也与分子扩散系数 ν 、 α 、 D_{AB} 的因次相同，单位均为 m^2/s 。在涡流传递过程中， ϵ 、 ϵ_H 和 ϵ_M 大致相等，在某些情况下，其中二者或三者完全相等。因此，对于动量、热量与质量传递可用类比的方法进行研究，它们之间不但在许多场合下的数学模型是类似的，而且有些物理量之间还有关联的关系。

需要注意的是：分子扩散系数 ν 、 α 和 D_{AB} 是物质的物理性质，它们仅与温度、压力及组成等因素有关；但涡流扩散系数 ϵ 、 ϵ_H 和 ϵ_M 则与流体的性质无关，而与湍动的程度、流道中的位置、边壁粗糙度等因素有关。因此，涡流扩散系数不是一个固定的物性参数，较难确定。

表 1.1-1 中列出了三种情况下的通量表达式。

1.1.4 无因次传递准数

动量、热量与质量传递中，有时其中二种或三种传递过程都同时存在。这时可以使用如下三个无因次数群中的两个或三个来表达不同传递过程之间的关系。这三个无因次数群是普朗德数 (Prandtl number)、施密特数 (Schmidt number) 与刘易斯数 (Lewis number)。三者的定义分别为

普兰德数

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (1.1-11)$$

施密特数

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (1.1-12)$$

刘易斯数

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{k}{\rho C_p D_{AB}} \quad (1.1-13)$$

表 1.1-1 动量、热量和质量传递的流量表达式

	只有分子运动的传递过程	以涡流运动为主的传递过程	兼有分子运动和涡流运动的传递过程
动量流量	$\tau = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy}$	$\tau^E = -\epsilon \frac{d(\rho u_x)}{dy}$	$\tau_t = -(\nu + \epsilon) \frac{d(\rho u_x)}{dy}$
热量流量	$\frac{q}{A} = -\alpha \frac{d(\rho C_p T)}{dy}$	$\left(\frac{q}{A}\right)^E = -\epsilon_H \frac{d(\rho C_p T)}{dy}$	$\left(\frac{q}{A}\right)_t = -(\alpha + \epsilon_H) \frac{d(\rho C_p T)}{dy}$
质量流量	$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy}$	$j_A^E = -\epsilon_M \frac{d\rho_A}{dy}$	$j_{At} = -(D_{AB} + \epsilon_M) \frac{d\rho_A}{dy}$

当系统中动量传递和热量传递同时存在时，应用普兰德数 Pr ，动量传递和质量传递同时存在时，应用施密特数 Sc ，热量传递和质量传递同时存在时，则应用刘易斯数 Le 。当 Pr 或 Sc 或 Le 等于 1 时，表示同时进行的相应的两种传递过程是类比的，这时可以用一类传递过程的结果去预测另一类传递过程。例如，当 $Pr=1$ 时，表明动量传递与热量传递两过程可以类比，于是可用摩擦系数的数值去估算对流传热系数的数值。通过它们之间的类似关系，有时可用某一类传递过程的简单解导出另一类传递过程中相当复杂问题的解。

大多数气体的 Pr 接近于 1，但液体的 Pr 范围很宽，自液态金属的 Pr 小于 0.05 至黏性油的 Pr 大于 1000。对于大多数气体，其 Sc 也接近于 1，但液体 Sc 之值很大。由此可见，气体的动量、热量和质量传递过程的类似性较为明显，而液体的类似性误差较大。常压 (101.3kPa) 下某些气体的 Pr 数见图 1.1-2，甲烷、空气的普兰德数 Pr 与压力的关系如图 1.1-3 所示。气体的 Pr 数按 Eucken 式估算：

$$Pr = C_p / (0.9 + 1.32C_p) \quad (1.1-14)$$

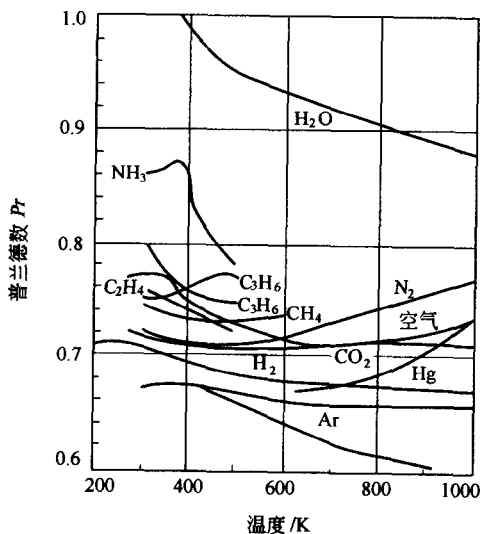


图 1.1-2 常压 (101.3kPa) 下某些气体的 Pr

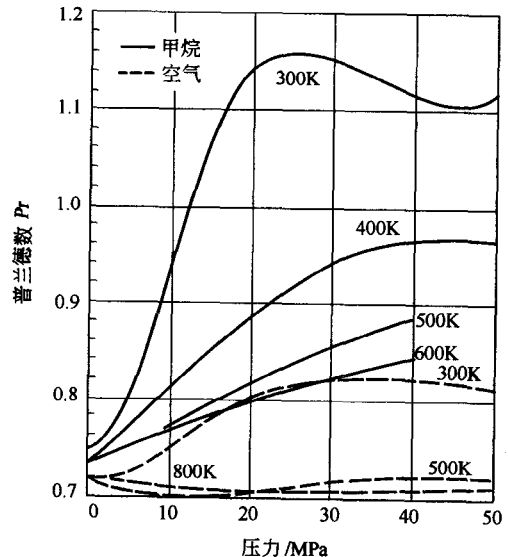


图 1.1-3 甲烷、空气普兰德数 Pr 与压力的关系

单原子的气体如 Ar: $Pr=0.67$, 非极性线性分子气体如 CO_2 : $Pr=0.73\pm 15\%$, 非极性非线性分子气体如 C_3H_8 : $Pr=0.79\pm 15\%$, 极性气体如 H_2O 蒸气, 氨气: $Pr\approx 1.0$, 一般气体: $Pr=0.86\pm 8\%$ 。

液体的 Pr 数可用 Denbigh 式计算,

$$\lg Pr = A(\Delta H_v/T) - 1.8 \quad (1.1-15)$$

式中 T ——温度, K;

ΔH_v ——蒸发潜热, cal/mol;

A ——常数, $A=0.10$ 。

本式不适用于分子量大于 150 的物质。

一些物质在空气中扩散的 Sc 数, 见表 1.1-2。

表 1.1-2 一些物质在空气中扩散的 Sc 数 (25°C, 0.1MPa, 低浓度)

物质	Sc	物质	Sc	物质	Sc	物质	Sc	物质	Sc	物质	Sc
氮	0.78	CO_2	0.94	丙酸	1.56	乙基苯	2.01	丙醇	1.55	氯化苯	2.12
苯	1.76	联苯	2.28	二甲苯	2.18	CS_2	1.45	丁醇	1.72	氯化甲苯	2.38
水	0.60	O_2	0.75	正辛烷	2.58	甲醇	0.97	戊醇	2.21	乙醚	1.66
H_2	0.22	醋酸	1.16	丙基苯	2.62	乙醇	1.30	己醇	2.60		

表 1.1-3 一些二组分气体扩散的 Sc 数

A	B	Sc		A	B	Sc		A	B	Sc	
		100%A	100%B			100%A	100%B			100%A	100%B
水	空气	0.553	0.602	氮	空气	0.634	0.67	NO_2	空气	0.765	1.12
水	水煤气	0.44	0.44	氮	CO_2	1.0	0.565	苯	氮	9.87	2.84
水	CO_2	0.49	0.49	氮	丁烷	1.03	0.255	苯	空气	3.77	1.72
氨	氢	0.18	1.195	SO_2	空气	0.36	1.11	苯	CO_2	5.55	1.33

表 1.1-4 某些液体的 Sc 数 (20°C)

溶质	溶剂	Sc	溶质	溶剂	Sc	溶质	溶剂	Sc
Br_2	水	840	NaOH	水	665	丁醇	水	1310
Cl_2	水	710	O_2	水	482	丙醇	水	1150
CO_2	水	670	乙炔	水	557	甲醇	水	785
H_2	水	169	乙醇	水	1005	CO_2	乙醇	445
HCl	水	381	甘油	水	1400	氯仿	乙醇	1330
HNO_3	水	390	醋酸	水	1140	苯酚	乙醇	1900
H_2S	水	615	丙烯酸	水	1080	氯仿	苯	350
H_2SO_4	水	580	蔗糖	水	2230	醋酸	苯	384
NH_3	水	492	尿素	水	946	二氯乙烯	苯	301
N_2	水	529	对苯二酚	水	1300	苯酚	苯	479
N_2O	水	574	邻苯三酚	水	1440			
NaCl	水	745	苯酚	水	1200			

一些二组分气体扩散的 Sc 数见表 1.1-3, 某些液体溶液的 Sc 数见表 1.1-4。气体组分自扩散时, $Sc=0.83$, 对于气体 1 在气体 2 中扩散 (组分 1 为低浓度) 的施密特数 Sc_{12} 可用下式估算:

$$Sc = 1.18 \left(\frac{\Omega_D}{\Omega_V} \right) \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_2} \right)^2 \times \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} \right)^{1/2} \quad \sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

式中 Ω_D ——扩散的碰撞积分；

Ω_V ——黏度的碰撞积分；

σ_1, σ_2 ——势长常数, 10^{-10} m；

M ——分子量。

以上常数可查阅有关文献中的图表。

1.2 流体的黏度

黏度是流体的一种物理性质, 它仅是流体状态 (压力、温度、组成) 的函数, 与剪应力或速度梯度 (剪切速率) 无关。气体的黏度随温度升高而增加; 液体的黏度随温度的升高而降低。所有液体的黏度与同温度下该液体变为蒸气状态时的黏度相比要高很多。理想气体的黏度与压力无关, 但实际气体和液体的黏度一般随压力的升高而增加。

凡是遵循牛顿黏性定律的流体均称为牛顿型流体。所有气体和低分子量的大多数液体均属于牛顿型流体。不遵循牛顿黏性定律的流体统称为非牛顿型流体, 某些泥浆、污水、聚合物溶液和油漆之类的流体均属之。研究非牛顿型流体的学科称为流变学。

1.2.1 黏度的单位

流体黏度的定义如式 (1.1-1) 所述, 根据牛顿黏性定律, 剪切流体膜所需要的力和液

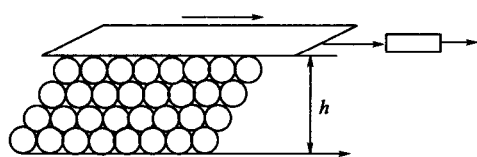


图 1.2-1 黏度的定义示意图

体的一个性质 (黏度) 和系统的两个几何因数 (即剪切的面积和速度梯度) 有关。速度梯度即相邻两层液体之间的滑动速度, 或称剪切率或剪切速率。图 1.2-1 表示了这种关系。牛顿定律的定量关系如下式,

$$\text{力} = \text{动力黏度} \times \text{面积} \times \frac{\text{速度}}{\text{膜厚度}}$$

或写成

$$F = \mu A \frac{u}{h} \quad (1.2-1)$$

式中 F ——力, N;

μ ——动力黏度 (Dynamic viscosity);

A ——面积, m^2 ;

u ——速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

h ——膜厚度, m。

μ 即黏度, 当 μ 为常数时, 叫牛顿流体, μ 为变数时, 叫非牛顿流体。 μ 一般表示动力黏度 (或绝对黏度)。在 cgs 制中, 其单位为泊 (P)。泊的单位太大, 通常使用厘泊 (cP)。根据式 (1.2-1) 可导出 SI 制单位。

$$\mu = \frac{F}{A} \times \frac{h}{u}$$

式中, F/A 的单位和压力的单位相同, SI 单位中用帕 (Pa); h/u 的单位为 $\frac{\text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$ 秒, 所以动力黏度单位为帕·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。二者的换算关系为:

$$1 \text{ 毫帕} \cdot \text{秒} = 1 \text{ 厘泊}, 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ cP}$$

ν 的单位为 m^2/s 。在 cgs 制中运动黏度单位用沱表示，因为沱的单位太大通常用厘沱 (cSt) 来表示。最近厘沱的译名又改为厘斯。SI 单位和 cgs 单位的对应关系如下：

$$1 \text{ 毫米}^2/\text{秒} = 1 \text{ 厘斯}, 1 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} = 1 \text{ cSt}$$

1.2.2 气体黏度

1.2.2.1 纯气体黏度

在常压 (101.3kPa) 下的纯气体黏度见图 1.2-2，图中对应于各种纯物质的 X、Y 坐标值见表 1.2-1。在各种温度 (K) 及常压 (101.3kPa) 或压力为 709.1kPa 下的烷烃、烯烃、二烯烃、炔烃蒸气的黏度见图 1.2-3。

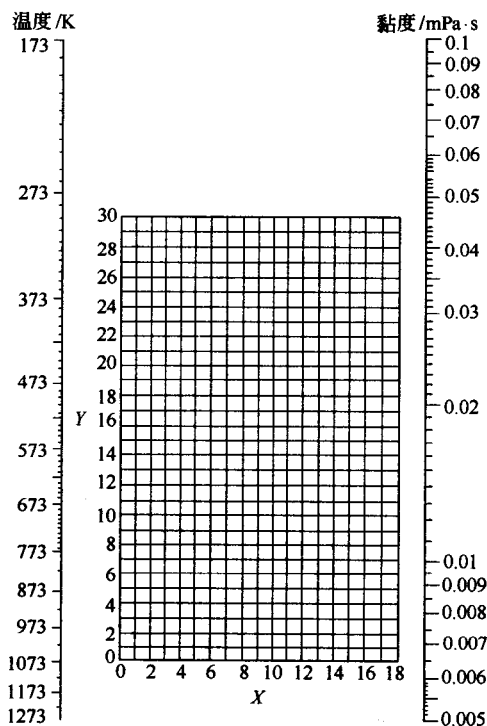


图 1.2-2 常压下纯气体黏度

表 1.2-1 图 1.2-2 中的 X、Y 坐标值

名 称	分子式	X	Y	名 称	分子式	X	Y
氩	Ar	10.5	22.4	一氧化碳	CO	11.0	20.0
溴	Br ₂	8.9	19.2	二氧化碳	CO ₂	9.5	18.7
氯	Cl ₂	9.0	18.4	二硫化碳	CS ₂	8.0	16.0
氟里昂-12	CCl ₂ F ₂	11.1	16.0	乙炔	C ₂ H ₂	9.8	14.9
氟里昂-11	CCl ₃ F	10.6	15.1	乙烯	C ₂ H ₄	9.5	15.1
四氯化碳	CCl ₄	9.0	15.5	醋酸	C ₂ H ₄ O ₂	7.7	14.3
氟里昂-22	CHClF ₂	10.1	17.0	氯乙烷	C ₂ H ₅ Cl	8.5	15.6
氟里昂-21	CHCl ₂ F	10.8	15.3	乙烷	C ₂ H ₆	9.1	14.5
氯仿	CHCl ₃	8.9	15.7	乙醇	C ₂ H ₆ O	9.2	14.2
氯甲烷	CH ₃ Cl	8.7	16.8	氟里昂-113	C ₂ Cl ₃ F ₃	11.3	14.0
甲烷	CH ₄	9.9	15.5	丙烯	C ₃ H ₆	9.0	13.8
甲醇	CH ₄ O	8.5	15.6	丙酮	C ₃ H ₆ O	8.9	13.0